关于促进中华鲟适应葛洲坝阻断洄游路径的可能性探讨

杨海乐

（上海市水生野生动植物保护研究中心，中国 上海，200092）

摘要：葛洲坝截流后，中华鲟种群陷入螺旋衰退，受后续涉水工程等的进一步影响，中华鲟种群快速衰减，并于 2013 年首次出现自然繁殖中断。其中的关键在于，中华鲟未能及时适应葛洲坝截流后的洄游繁殖条件变化。本文从恢复中华鲟野外可持续种群的目标出发，首先提出促进中华鲟适应葛洲坝截流后洄游繁殖条件的需求，然后尝试从种群遗传的生态学适应角度分析中华鲟适应葛洲坝截流后洄游繁殖条件的可能性，探讨了促进中华鲟适应葛洲坝截流后洄游繁殖条件的可能性，最后从操作层面上梳理了促进中华鲟适应葛洲坝截流后洄游繁殖条件的具体困难及未来预期。期待本文能够引起大家对相关问题的关注和讨论，促进各方在中华鲟保种繁育、增殖放流、种群恢复的细节问题上进一步凝聚共识。

关键词：中华鲟；洄游节律；遗传结构；等位基因；基因频率；遗传管理；适应；种群恢复

Discussion on the possibility of promoting Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) adapt to the new environment with that the Gezhou dam blocked its traditional migratory path

Yang Haile

(Shanghai Aquatic Wildlife Conservation and Research Center, Shanghai, China 200092)

Abstract: As a flagship species in the Yangtze River, Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) fell into a spiral population decline driven by the Gezhou Dam. Then, further impacted by the subsequent water projects, the population of the Chinese sturgeon declined rapidly, and its natural reproduction was interrupted in 2013. The field population of the species is critically endangered. The key problem in this tragedy is that the Chinese sturgeon failed to adapt to the changes in migration and breeding conditions caused by the Gezhou Dam. Aimed the goal of restoring self-sustaining populations of wild-spawning Chinese sturgeon, the current manuscript 1) raised the demand of promoting the adaptation of Chinese sturgeon to the new migration and breeding conditions; 2)

explained the possibility of Chinese sturgeon adapting to the new migration and breeding conditions in the perspective of population genetics; 3) discussed the practical possibility of promoting the adaptation of Chinese sturgeon to the new migration and breeding conditions; 4) finally, delineated the operational difficulties and future expectations of promoting the adaptation of Chinese sturgeon to the new migration and reproduction conditions. We hope that the current discussion could promote the formation of the consensus on the Chinese sturgeon conservation issues of the preservation and breeding of artificial population, enhancement and releasing of juveniles, and self-sustaining population restoration of wild-spawning Chinese sturgeon.

Key words: Chinese sturgeon; migration rhythm; genetic structure; allele;allele frequency; genetic management; adaptation; population restoration

中华鲟（*Acipenser sinensis*）为国家一级保护野生动物，是一种古老的软骨硬鳞鱼，隶属于硬骨鱼纲，鲟形目，鲟科，鲟属(赵峰与庄平等, 2018)，最大体长可达 4 m、最大体重可达 600 kg、最大寿命可达 40 龄(张世义, 2001)，有“长江鱼王”之称，是大型江海洄游性鱼类，是长江水坝救鱼的主要对象(黄真理与王鲁海, 2020)，是长江水生生物旗舰种和伞护种，也是数十年来长江水生态系统退化的象征性指示(高欣与林鹏程等, 2021)。

1981 年，中华鲟的传统繁殖洄游路径被葛洲坝截流阻断，中华鲟的整个洄游繁殖过程遭受重创(Huang and Wang, 2018)，中华鲟的繁殖江段被压缩转移到葛洲坝下约 4km 的替代产卵场江段(危起伟, 2020)。随着 2003 年三峡水库下闸蓄水、2004 年葛洲坝下河势调整、2008 年葛洲坝下航道疏浚等一些涉水工程的实施和运营，导致葛洲坝下中华鲟替代产卵场功能的退化(班璇与肖飞, 2014; Gao and Lin et al., 2016; Zhang and Kang et al., 2019)。

虽然中央和地方采取了一系列保护措施，1983 年禁止中华鲟的商业捕捞、1984 年开始开展中华鲟的增殖放流、1988 年将中华鲟列为国家一级保护野生动物、1996 年设立长江湖北宜昌中华鲟自然保护区、2002 年设立上海市长江口中华鲟自然保护区、2003 年长江实行全长江禁渔期制度、2008 年禁止中华鲟的科研捕捞、2020 年《上海市中华鲟保护管理条例》施行、2021 年长江流域重点水域全面禁捕等，但中华鲟自然种群仍然持续萎缩(许兰馨与周亮等, 2023)，并于 2013 年首次出现自然繁殖中断(吴金明与王成友等, 2017)，2017～2023 年已连续 7 年未监测到中华鲟自然繁殖(董芳与危起伟, 2024)，其自然种群延续已面临严重困难(Huang and Wang, 2018; 谢平, 2020)。

1 提出促进中华鲟适应葛洲坝阻断洄游路径的基本逻辑

葛洲坝截流以来，中华鲟自然种群陷入螺旋衰退。1982 年，葛洲坝截流阻断中华鲟传统洄游繁殖路径，使得中华鲟生殖洄游距离缩短 1175 千米，影响中华鲟洄游亲本的性腺发育（包括性腺发育成熟时间延滞和性腺发育成熟比例降低）(胡德高与柯福恩等, 1983; 曾文宣与邓中粦等, 1989; 肖慧与刘勇等, 1999)，进而导致中华鲟性腺发育节律与产卵时间窗口产生错位（即性腺发育节律失配），虽然中华鲟在葛洲坝下（两江泄水闸至十里红江段，有的年份延伸至虎牙滩江段）成功实现了自然繁殖(曾文宣与邓中粦等, 1989)，但参与繁殖的亲本比例骤减至 24.2%(Huang and Wang, 2018)，同时也导致了卵子和精子质量下降，进而导致子代个体生长发育状况不佳，怀卵量降低(陶江平与乔晔等, 2009)，以及卵子和精子质量进一步下降，受精率降至 29.7%左右(张陵与郭文献等, 2022)，这对中华鲟自然种群存续带来了致命影响，中华鲟自然种群陷入螺旋衰退。每循环一个生命周期，中华鲟繁殖群体规模就萎缩一部分，并将最终走向灭绝。

2003 年，三峡蓄水对径流的调节致使中华鲟繁殖季节水温升高，导致产卵窗口后移一个月左右(危起伟, 2020)，进一步加剧中华鲟洄游亲本的性腺发育节律和产卵窗口的错位，产卵活动也从之前的 2 次减少为 1 次(Gao and Lin et al., 2016; 危起伟, 2020)，参与繁殖的亲本比例继续下降，降至 0-4.5%(Huang and Wang, 2018)。葛洲坝下 2004 年的河势调整和 2008 年的航道疏浚改变了中华鲟替代产卵场的地形和底质，导致了产卵场功能的退化、容量的降低(王成友, 2012; 班璇与肖飞, 2014)，进一步限制了参与繁殖的中华鲟亲本数量。在多重因素的叠加影响下，中华鲟种群持续萎缩(王鸿泽与陶江平等, 2019)，经过两个世代的迭代，2013 年首次出现自然繁殖中断(吴金明与王成友等, 2017)，2018 年后洄游繁殖群体更是减小到不足二十尾(董芳与危起伟, 2024)，不足以开展自然繁殖活动，自然种群岌岌可危(Huang and Wang, 2018; 谢平, 2020)。很显然，中华鲟自然种群对葛洲坝截流后的生境改变的不完全适应是导致中华鲟种群衰退和最终趋向灭绝的核心因素之一。

要扭转当前中华鲟自然种群衰退和逐步走向灭绝的趋势，除了开展“增殖放流”“生态调度”“产卵场修复”外(危起伟, 2020; 董芳与危起伟, 2024; 庄平与张涛等, 2024)，还需要采取措施促进中华鲟自身能够适应葛洲坝阻断洄游路径的影响，即性腺发育节律重新适配环境条件（性腺发育节律与产卵窗口重新对上）、受精率恢复（配子质量状况得以改善）、怀卵量恢复（下一代亲本生长发育状况得以改善）。在当前葛洲坝截流所导致的中华鲟洄游通道阻断、

原有长江上游产卵场丧失等问题难以消除的条件下，在当前"增殖放流""生态调度""产卵场修复"逐步推进的条件下，采取措施促进中华鲟自身能够适应葛洲坝截流后的繁殖条件，属于是"改变不了环境，那就改变自己"的逆向思维和操作，对于未来实现中华鲟野外可持续群体的恢复来讲或许是一个关键突破点。

2 促进中华鲟适应葛洲坝阻断洄游路径的理论可能性

环境条件通过塑造一个物种的种群遗传结构（比如基因型组成和频率、比如甲基化等表观遗传）影响其种群的适应性(Banks and Cary et al., 2013; Tian and Zhang et al., 2024)，同时一个物种种群也可通过改变种群遗传结构来实现适应环境变迁(Van'T Hof and Campagne et al., 2016; 王争艳与王文芳等, 2021; 陈兵与骆家宇, 2023)。这是生态与进化研究所得到的一个普遍的模式，在动物、植物中均有验证(Van'T Hof and Campagne et al., 2016; 王争艳与王文芳等, 2021; 陈兵与骆家宇, 2023; Tian and Zhang et al., 2024)，该模式可以简化表示如图 1。一个物种中的某一特定遗传特征（比如基因型，后文以基因型代之）往往对相应环境条件有一定的适合度（图 1A）。每个基因型对相应环境的适合度也会具有一定谱宽，这个适合度谱可以是一个正态分布或拟正态分布（图 1A）。在适合度拖尾所覆盖的环境条件部分，具有该基因型的个体可能具有一定的适应而幸存，但也往往会因为对环境的适应匹配度不高，而导致生存质量、生长发育质量以及繁殖质量的降低。一个健康的物种种群往往有一定的遗传多样性（如基因型多样性），不同基因型往往对不同的环境条件有一定的适合度（图 1B）(Booy and Hendriks et al., 2000)。不同的基因型所适应的环境条件可以有一定的重合度（图 1B）。这种不同基因型对所适应的环境条件的部分重合，是种群遗传结构在相关适应能力上的冗余。一个健康物种种群基于遗传多样性在相关适应能力上的冗余，实现了其对环境条件的广谱适应（图 1C）(Markert and Champlin et al., 2010)。这种群体的广谱适应，一方面依赖于环境条件的连续性，另一方面也依赖于相关基因型的组成和频率，二者最终决定群体对环境条件的适合度分布特征（图 1C）。当然这里的基因型更关注适应性基因型（与所适应环境相关的功能基因的基因型）(HOLDEREGGER and KAMM et al., 2006; Whitlock and Lortie, 2014; Teixeira and Huber, 2021; Chung and Merilä et al., 2023)。

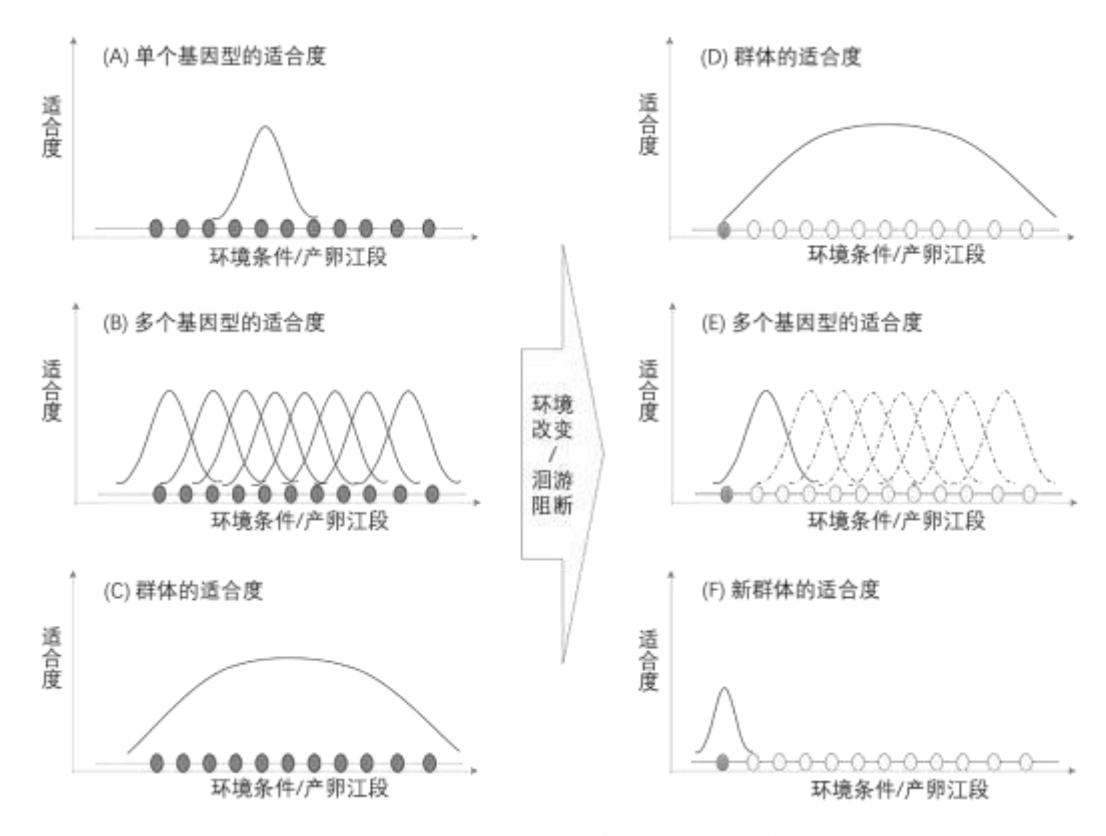


图 1 遗传结构与环境条件间适应的示意图

Fig 1. Diagram of genetic structure adapting to environmental conditions

注：横坐标方向上的实心圆点代表可用环境条件（或产卵场），空心圆点代表不可用环境条件（或产卵场）（即环境改变（或洄游阻断）后被迫废弃的旧环境条件（或产卵场））

当一个物种种群所依赖的环境发生剧变，种群也会呈现出对环境变迁有一定的适应能力，这种适应来自于遗传多样性(Jump and Marchant et al., 2009; Markert and Champlin et al., 2010)，也来自于表达多样性(Liu and Kang et al., 2019)，但无论如何这个适应必然会伴随着种群的短期较大规模损失（图 1D）(Markert and Champlin et al., 2010)。当一个物种在新环境下依然具有较强的扩张能力时，即平均每个亲本所产子代中发育成熟并最终参与繁殖的个数远大于 1 时（暂称之为繁殖扩张系数远大于 1），种群在适应环境变迁的过程中所产生的短期较大规模损失可能不足以威胁到该种群的可持续；但当一个物种在新环境下不具有较强的扩张能力时，这种损失可能是致命的，会导致物种灭绝。随着环境剧变而产生的种群大规模损失，其实质是那些具有完全无法适应新环境的基因型的个体被淘汰，无法继续参与繁殖、无法进行遗传物质的传递（图 1E）。与之同时，那些适合度谱和新环境条件有一定重合的基因型的个体不会被完全淘汰（图 1E），但其生长发育状况、繁殖能力可能也会受一定的影响，比如个体小型化、繁殖规模减小、配子质量下降、子代生长发育性能降低等。随着那些具有完全无

法适应新环境的基因型的个体被淘汰，具有能够适应新环境的基因型的个体繁殖成功，在环境容量足够的情况下，该物种种群如果没有陷入螺旋衰退（繁殖扩张系数远大于 1），那么经过数个生活史周期，就有可能建立新的适应新环境的群体（图 1F）。这个新群体在不断适应新环境的过程中也有可能形成新的种群遗传结构（图 1F）。

因为图 1 所示的基本模式是在动物、植物的生态与进化研究中均有验证的一个普遍模式，所以可以假设中华鲟自然种群随环境变迁历程遵循图 1 所示的基本模式。1981 年以前，中华鲟自然群体历史产卵场分布于从长江上游到金沙江下游的超 600km 的江段(危起伟, 2020)，即中华鲟自然群体对产卵江段存在较为广谱的适应（图 1C）。与这种广谱适应相匹配的是，中华鲟在溯河洄游阶段，亲本性腺发育进程随着溯河洄游过程不断推进(Huang and Wang, 2018)，不同个体（或具有不同基因型）性腺发育成熟有早有晚，不同个体的性腺发育节律匹配不同产卵江段，进而形成整个群体对整个江段的适应性覆盖（图 1B）。这其中可以假设，具有特定基因型的个体只最适匹配一个相对较小的产卵江段（图 1A）。总的来讲，中华鲟历史产卵场分布的广谱，可以映射中华鲟历史种群性腺发育节律的广谱，映射中华鲟性腺发育节律相关控制基因或基因族的广谱。反过来讲，中华鲟性腺发育节律相关控制基因或基因族的组成及其频率分布，通过基因表达表现为中华鲟历史种群性腺发育的节律及其频率分布上，进而对应到中华鲟在溯河洄游繁殖过程中对所适应产卵场的空间位置及环境容量的适配上，这三者的组成及其频率分布可能都有一定双侧拖尾的正态分布或拟正态分布特征。

1981 年葛洲坝截流阻断了中华鲟传统的洄游繁殖路径，失去了传统所有的产卵场江段。中华鲟在葛洲坝下形成替代产卵场(胡德高与柯福恩等, 1983; 曾文宣与邓中粦等, 1989)，意味着中华鲟群体所能适应产卵场的空间位置的拖尾覆盖了葛洲坝下江段（图 1D），而偏低的繁殖参与率(柯福恩, 1999; 危起伟, 2003; 陶江平与乔晔等, 2009)，则说明相当一部分个体（具有某些基因型）所能适应产卵场的空间位置与葛洲坝下江段完全不重合（图 1E）。同时，在葛洲坝截流至三峡蓄水期间，中华鲟在葛洲坝下产卵场每年存在两次产卵现象(Gao and Lin et al., 2016; 危起伟, 2020)，考虑到中华鲟的群体性繁殖行为(polygynandry)习性(Yu and Gao et al., 2023)，两次产卵现象也意味着不同个体（或具有不同基因型）存在性腺发育成熟节律的差异（图 1B），具有不同性腺发育成熟节律的个体在空间受限的葛洲坝下替代产卵场在产卵时间窗口内被迫以时间换空间，形成两个产卵繁殖群体（图 1E）。三峡蓄水后，受滞温效应的影响(Zhang and Kang et al., 2019)，中华鲟在葛洲坝下产卵场的繁殖时间推迟，且只剩下一次产卵繁殖(Gao and Lin et al., 2016; 危起伟, 2020)，这意味着在滞温效应影响下，产卵时

间窗口向后平移之后，部分以时间换空间的群体错失了产卵繁殖窗口（图 1E）。而后续降低的怀卵量和受精率(肖慧与刘勇等, 1999; 危起伟, 2003; 张陵与郭文献等, 2022)，则说明所能适应产卵场的空间位置与葛洲坝下江段有重合的个体（具有某些基因型）对坝下江段的适合度也不高，即该系列个体（具有某些基因型）所能适应产卵场的空间位置的拖尾覆盖了葛洲坝下江段，而非高适合度的位置在葛洲坝下江段（图 1E）。鉴于葛洲坝截流至今的中华鲟繁殖群体持续衰退，到 2013 年洄游到坝下产卵场的个体已开始不足以支撑中华鲟的自然繁殖(吴金明与王成友等, 2017; 危起伟, 2020; 许兰馨与周亮等, 2023)，说明中华鲟种群已陷入螺旋衰退（繁殖扩张系数小于 1）。从理论上来讲，通过提高能够参与繁殖的个体（具有某些基因型）的繁殖扩张系数，扩大其后代参与对葛洲坝截流后环境适应的规模，在几个生命周期后，中华鲟应该有可能建立一个具有较高适合度的新群体（图 1F）。

本文中的一个核心假设，中华鲟性腺发育节律受遗传因子影响，是符合逻辑、符合预期的，但下一步工作需要对其进行验证。历史上中华鲟存在珠江群体和长江群体，其中珠江群体为春季繁殖，长江群体为秋季繁殖，养殖的长江群体中华鲟性腺最终成熟的季节与野生中华鲟一致，都是秋季，曾有试图进行春季催产但未获成功，当前对中华鲟长江群体的人工催产繁殖也都是在秋季，从此现象可以简单推断中华鲟的性腺发育节律是受其内在的遗传因素控制的(危起伟, 2020)。虽然这个推断是基于珠江群体和长江群体的对比分析来推出的，但中华鲟的性腺发育节律受其内在的遗传因素控制应该是普遍的，即遗传因素控制了中华鲟珠江群体和长江群体之间的性腺发育节律季节间差异，也控制了中华鲟长江群体内不同个体之间的性腺发育节律季节内差异。该推断（假设）在逻辑上应该是可接受的，在事实上也应该是可能的。但当前尚未有针对中华鲟长江群体内不同个体的遗传差异和性腺发育节律关系的研究来证实该假设，因而在本研究思路形成共识后，应该先组织力量着手检验该假设。

3 促进中华鲟适应葛洲坝阻断洄游路径的实践可能性

如上所述，历史上中华鲟群体的性腺发育节律相关控制基因或基因族的组成及其频率分布，决定了中华鲟历史种群性腺发育的节律及其频率分布，进而对应到中华鲟在溯河洄游繁殖过程中所适应产卵场的空间位置及其频率分布，三者的组成及其频率分布可能都有一定双侧拖尾的正态分布或拟正态分布特征。从葛洲坝截流阻断中华鲟传统的洄游繁殖路径以来，中华鲟在葛洲坝下形成替代产卵场(胡德高与柯福恩等, 1983; 曾文宣与邓中粦等, 1989)，但繁殖参与率偏低(柯福恩, 1999; 危起伟, 2003; 陶江平与乔晔等, 2009)，并且一代后的繁殖亲

本怀卵量和受精率均有降低(肖慧与刘勇等, 1999; 危起伟, 2003; 张陵与郭文献等, 2022)，经过两代之后繁殖群体已衰退到无法支撑自然繁殖(吴金明与王成友等, 2017; 危起伟, 2020; 许兰馨与周亮等, 2023)。这说明历史上中华鲟自然繁殖群体有一小部分个体（具有某些基因型）所能适应产卵场的空间位置的拖尾覆盖了葛洲坝下江段，但对坝下江段的适合度也不高，导致其种群陷入螺旋衰退，野外种群岌岌可危。为了恢复中华鲟野外可持续种群，亟需人工提高能够参与繁殖的个体（具有某些基因型）的繁殖扩张系数，扩大其后代参与对葛洲坝截流后环境适应的规模，坚持几个生命周期后，最终建立一个对葛洲坝截流后的环境具有较高适合度的新群体。

首先，需要找到中华鲟性腺发育节律相关控制基因或基因族，评估当前人工保种 F1 和 F2 群体（其野生亲本来自于 1995 年以前）在相关基因或基因族上的多样性、基因型组成及其频率，评估当前人工保种 F0 群体（2003 年以后出生的野生个体）在相关基因或基因族上的多样性、基因型组成及其频率。通过人工保种 F0 群体的相关基因或基因族的多样性、基因型组成及其频率和人工保种 F1 和 F2 群体的相关基因或基因族的多样性、基因型组成及其频率的对比，找出哪些基因型可能更能适应当前葛洲坝截流后的环境。这其中的假设是：1995 年以前的野生亲本及其人工繁育后代，未经受或较少经受葛洲坝截流导致的生境改变对其性腺发育和繁殖过程的影响，其在相关基因或基因族上的基因型组成及其频率更接近历史本底。2003 年以后出生的野生个体，其亲本已经受葛洲坝截流导致的生境改变对其性腺发育和繁殖过程的影响，其本身更是该影响过程筛选下的幸存者，其在相关基因或基因族上的基因型组成及其频率更接近适应葛洲坝截流后环境的特征。

然后，需要整合当前各中华鲟保种基地所有保种群体，推进建立统一的遗传资源库，通过基于分子生物学方法的亲子鉴定技术开展遗传谱系管理，制定不同基地保种群体遗传资源整合和共享机制，优化繁殖配对技术和策略(董芳与危起伟, 2024; 姜伟与杜合军等, 2024)，充分利用具有可能更能适应当前葛洲坝截流后环境的基因型的保种个体，一方面扩大其子代保种梯队数量和未来增殖放流规模，另一方面扩大其在后续保种梯队和未来增殖放流群体中的基因型频率，发挥遗传资源的有效性。从遗传层面上增强未来中华鲟洄游亲本性腺发育节律适应性，支撑后续繁殖群体的配子质量恢复、受精率恢复、个体生长发育恢复、怀卵量恢复，在几个生命周期后，最终建立一个对葛洲坝截流后的环境具有较高适合度的新可持续种群。

4 促进中华鲟适应葛洲坝阻断洄游路径的实践困难点

促进中华鲟适应葛洲坝阻断洄游路径的第一步，是找到和确认中华鲟性腺发育节律相关控制基因或基因族。目前，中华鲟性腺发育节律相关控制基因或基因族还未找到，甚至还未开始查找。如果现在启动项目开始查找，何时能找到还是个未知数。好消息是中华鲟全基因组的组装和信息解析已完成，共完成 66 条（2 个单倍型）参考基因组染色体序列的组装，BUSCO 的完整度评估结果达 95.6%，并进行了基因功能注释(Wang and Wu et al., 2023)。这为中华鲟性腺发育节律相关控制基因或基因族的查找提供了重要的参考数据。如果相关研究力量决意投入，中华鲟性腺发育节律相关控制基因或基因族的确定应该是可以期待的。

促进中华鲟适应葛洲坝阻断洄游路径的第二步，是找到和确认中华鲟性腺发育节律相关控制基因或基因族中，哪些基因型更能适应当前葛洲坝截流后的环境。一方面，中华鲟性腺发育节律相关控制基因或基因族还未找到，另一方面，人工保种 F0 群体和人工保种 F1、F2 群体在相关基因或基因族上的基因型组成及其频率上是否有明确的差异，还未知。如果有差异，是否能够从这些差异中有效识别出哪些基因型更能适应葛洲坝截流后的环境。从理论上来讲，人工保种 F0 群体和人工保种 F1、F2 群体在相关基因或基因族上的基因型组成及其频率上的差异应该是存在，从这些差异中定位哪些基因型更能适应葛洲坝截流后的环境可能是容易的，也可能是困难，但不是不可能的。

促进中华鲟适应葛洲坝阻断洄游路径的第三步，是充分利用具有相关基因型的保种个体，扩大其子代在保种梯队建设和增殖放流中的规模和占比。一方面，相关基因型还未确认，相应个体还未筛选出来，而当前人工保种 F0 群体（2003 年以后出生的野生个体）最晚一批是 2015 年的，将陆续进入繁育年龄，时间窗口紧张，另一方面当前的保种繁育能力不足，人工保种 F0 群体的生长发育状况亟待改善，遗传谱系管理、遗传资源整合共享、繁殖配对策略优化等工作亟待完善落实。好消息是对保种繁育、遗传管理等工作大家已有共识(董芳与危起伟, 2024; 姜伟与杜合军等, 2024)，同时主管部门也已组织中华鲟种源保护繁育基地的认定和管理，后续有望支持保种繁育设施规模扩大、人工保种繁育能力提升，推动遗传资源整合共享、保种繁育技术力量融合，推进生殖细胞冷冻保存、生殖干细胞移植等技术研发。

促进中华鲟适应葛洲坝阻断洄游路径的第四步，是人工提高具有相关基因型的个体的繁殖扩张系数，扩大其后代参与对葛洲坝截流后环境适应的规模。目前，亲本数量有限，繁殖能力有限，放流规模有限，亟需提高放流后的存活率，比如通过放流前野化提高放流个体成活率(Wang and Huang, 2024; 董芳与危起伟, 2024)，比如加强长江口及近海大陆架中华鲟的

监测与保护(姜伟与杜合军等, 2024)。这里面存在一个亟待回答或检验的问题，即中华鲟繁殖洄游是否存在印痕效应的问题，这其中涉及中华鲟是否有明确且必要的印痕效应(危起伟, 2020)，印痕形成的窗口什么时候什么条件下打开(Armstrong and Minkoff et al., 2022)，是只对出生地有印痕还是对整个降河路径有印痕(Havey and Dittman et al., 2017)，繁殖洄游过程中印痕效应是不是唯一的导航机制(Ueda, 2011)等。只简单就当前来说，如果接受印痕效应（印痕由仔稚鱼在出生地形成）的假设，就应该在繁育阶段引入产卵场水体进行印痕形成，然后集中在产卵场区域放流稚鱼，保障放流个体在成熟之后能够洄游到产卵场进行繁殖，尽快停止当前的成体亚成体放流、多江段放流等行为；如果不接受其假设，就应该鼓励更多地在长江口水域进行野化放流，减少稚幼鱼在中游放流后降河过程所产生的损失，提高放流存活率。目前主管部门已安排每年 5000 万元专项资金开展中华鲟增殖放流，2024 年要实现 100 万尾的规格苗放流，并争取未来三到五年能够逐步增加到 500 万尾。在主管部门已关注到看得见的规模的时候，中华鲟物种保护单位应该花点儿精力去关注看不见的放流个体质量，提高放流个体存活率，提高放流个体未来洄游繁殖中适应葛洲坝阻断洄游路径的能力。

参考文献

Armstrong, M. E. and D. Minkoff, et al. (2022). "Evidence of an olfactory imprinting window in embryonic Atlantic salmon." Ecology of freshwater fish **31** (2): 270-279.

Banks, S. C. and G. J. Cary, et al. (2013). "How does ecological disturbance influence genetic diversity?" Trends in ecology & evolution (Amsterdam) **28** (11): 670-679.

Booy, G. and R. J. J. Hendriks, et al. (2000). "Genetic Diversity and the Survival of Populations." Plant biology (Stuttgart, Germany) **2** (4): 379-395.

Chung, M. Y. and J. Merilä, et al. (2023). "Neutral and adaptive genetic diversity in plants: An overview." Frontiers in ecology and evolution **11**.

Gao, X. and P. Lin, et al. (2016). "Impact of the Three Gorges Dam on the spawning stock and natural reproduction of Chinese sturgeon in Changjiang River, China." Chinese Journal of Oceanology and Limnology **34** (5): 894-901.

Havey, M. A. and A. H. Dittman, et al. (2017). "Experimental Evidence for Olfactory Imprinting by Sockeye Salmon at Embryonic and Smolt Stages." Transactions of the American Fisheries Society (1900) **146** (1): 74-83.

HOLDEREGGER, R. and U. KAMM, et al. (2006). "Adaptive vs. neutral genetic diversity : implications for landscape genetics: Landscape genetics." Landscape ecology **21** (6): 797-807.

Huang, Z. and L. Wang (2018). "Yangtze Dams Increasingly Threaten the Survival of the Chinese Sturgeon." Current Biology **28** (22): 3640-3647.e18.

Jump, A. S. and R. Marchant, et al. (2009). "Environmental change and the option value of genetic diversity." Trends in plant science **14** (1): 51-58.

Liu, W. and L. Kang, et al. (2019). "Increased expression diversity buffers the loss of adaptive potential

caused by reduction of genetic diversity in new unfavourable environments." Biology letters (2005) **15** (1): 20180583-20180583.
Markert, J. A. and D. M. Champlin, et al. (2010). "Population genetic diversity and fitness in multiple environments." BMC evolutionary biology **10** (1): 205-205.
Teixeira, J. C. and C. D. Huber (2021). "The inflated significance of neutral genetic diversity in conservation genetics." Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS **118** (10): 1.
Tian, H. and H. Zhang, et al. (2024). "Population genetic diversity and environmental adaptation of Tamarix hispida in the Tarim Basin, arid Northwestern China." Heredity.
Ueda, H. (2011). "Physiological mechanism of homing migration in Pacific salmon from behavioral to molecular biological approaches." General and comparative endocrinology **170** (2): 222-232.
Van'T Hof, A. E. and P. Campagne, et al. (2016). "The industrial melanism mutation in British peppered moths is a transposable element." Nature (London) **534** (7605): 102-105.
Wang, B. and B. Wu, et al. (2023). "Whole-genome Sequencing Reveals Autooctoploidy in Chinese Sturgeon and Its Evolutionary Trajectories." Genomics, proteomics & bioinformatics.
Wang, L. and Z. Huang (2024). "Passive drifting and high mortality rate of released subadult Chinese sturgeons in the Yangtze River." Reviews in fish biology and fisheries **34** (1): 201-219.
Whitlock, R. and C. Lortie (2014). "Relationships between adaptive and neutral genetic diversity and ecological structure and functioning: a meta-analysis." The Journal of ecology **102** (4): 857-872.
Yu, D. and X. Gao, et al. (2023). "Novel insights into the reproductive strategies of wild Chinese sturgeon (Acipenser sinensis) populations based on the kinship analysis." Water Biology and Security **2** (2): 100134.
Zhang, H. and M. Kang, et al. (2019). "Increasing River Temperature Shifts Impact the Yangtze Ecosystem: Evidence from the Endangered Chinese Sturgeon." ANIMALS **9** (8): 583.
班璇与肖飞 (2014). "葛洲坝下游河势调整工程对中华鲟产卵场的影响." 水利学报 **45** (01): 58-64.
曾文宣与邓中粦等 (1989). "葛洲坝水利枢纽工程的救鱼问题." 资源开发与保护(03): 8-12.
陈兵与骆家宇 (2023). "中华蜜蜂种群遗传分化与环境适应机制研究进展." 昆虫学报 **66** (09): 1258-1270.
董芳与危起伟 (2024). "论中华鲟抢救性保护的途径." 水生生物学报 **48** (09): 1610-1616.
高欣与林鹏程等 (2021). "基于中华鲟繁殖群体数量的长江中、下游生态环境考核指标." 水生生物学报 **45** (06): 1396-1399.
胡德高与柯福恩等 (1983). "葛洲坝下中华鲟产卵情况初步调查及探讨." 淡水渔业(03): 15-18.
黄真理与王鲁海 (2020). "长江中华鲟(Acipenser sinensis)保护——反思、改革和创新." 湖泊科学 **32** (05): 1320-1332.
姜伟与杜合军等 (2024). "中华鲟物种保护的历程、难点和方向." 水生生物学报 **48** (09): 1617-1624.
柯福恩 (1999). "论中华鲟的保护与开发." 淡水渔业(09): 4-7.
陶江平与乔晔等 (2009). "葛洲坝产卵场中华鲟繁殖群体数量与繁殖规模估算及其变动趋势分析." 水生态学杂志 **30** (02): 37-43.
王成友 (2012). 长江中华鲟生殖洄游和栖息地选择. 武汉, 华中农业大学. **博士**.
王鸿泽与陶江平等 (2019). "中华鲟濒危状况与物种保护对策的评估分析." 长江流域资源与环境 **28** (09): 2100-2108.
王争艳与王文芳等 (2021). "抗药性昆虫相对适合度的研究进展." 应用昆虫学报 **58** (03): 487-496.
危起伟 (2003). 中华鲟繁殖行为生态学与资源评估. 武汉, 中国科学院水生生物研究所. **博士**.
危起伟 (2020). "从中华鲟(Acipenser sinensis)生活史剖析其物种保护:困境与突围." 湖泊科学 **32**

(05): 1297-1319.
吴金明与王成友等 (2017). "从连续到偶发:中华鲟在葛洲坝下发生小规模自然繁殖." 中国水产科学 **24** (03): 425-431.
肖慧与刘勇等 (1999). "中华鲟人工繁殖放流现状评价." 水生生物学报(06): 572-576.
谢平 (2020). "我们能拯救长江中正在消逝的鲟鱼吗?" 湖泊科学 **32** (04): 899-914.
许兰馨与周亮等 (2023). "长江鲟类资源现状及保护." 水产学报 **47** (02): 62-72.
张陵与郭文献等 (2022). "长江流域珍稀特有物种中华鲟生态保护措施." 华北水利水电大学学报(自然科学版) **43** (01): 96-102.
张世义 (2001). 中国动物志 硬骨鱼纲 鲟形目 海鲢目 鲱形目 鼠鱚目. 北京, 科学出版社.
赵峰与庄平等 (2018). 长江口中华鲟生物学与保护. 北京, 中国农业出版社.
庄平与张涛等 (2024). "论拯救中华鲟野生种群及其栖息生境." 水生生物学报 **48** (09): 1625-1632.